

О. Н. СИНЧУК, докт. техн. наук, проф., Криворожский национальный университет;
Ю. Б. ФИЛИПП, канд. техн. наук, доц., Криворожский национальный университет;
В. А. ФЕДОТОВ, ст. преп., Криворожский национальный университет.

ОБЗОР ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ШАХТНЫХ КОНТАКТНО-АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Введение. На отечественных железорудных предприятиях для перевозки железорудного сырья и доставки материалов и людей в подземные горные выработки используют электровозный транспорт. В практике эксплуатации контактных электровозов через незначительное расстояние между контактным проводом (КП) и работающими горняками, к сожалению, имеют место поражения людей электрическим током и, как правило, 100 % из них с летальным результатом.

Постановка задачи. Одним из реальных направлений устранения этого негативного фактора является использование комбинированных по виду питания, электровозов. При этом, когда в магистральных выработках, где КП расположенный на довольно недоступной для несанкционированного прикосновения его горняками, электровоз получает питание от контактного провода, а при функционировании в особо опасных по высоте для горняков местах – погрузочных выработках – питание осуществляется от автономных источников [1]. На рис. 1 представлен один из возможных вариантов синергетической структуры тягового электрохимического комплекса такого электровоза для варианта автономного источника питания тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) [2,3].

Вместе с тем отмечаем, что в качестве автономного источника электрической энергии питания тяговых электрохимических комплексов электровозов могут быть использованы разные виды накопителей: аккумуляторы, суперконденсаторы и т.п. При этом отметим, что тактика подхода к созданию контактно-аккумуляторных электровозов может иметь два направления. Первое, это когда напряжение ТАБ равняется напряжению тяговой сети, и второе – напряжение ТАБ меньше напряжения контактной сети, и его достаточно лишь для кратковременного передвижения электровоза на низкой скорости при перестановке вагонеток при погрузочно-разгрузочных операциях. Цель исследований – выбор оптимальных параметров и типов аккумуляторов для тяговой батареи шахтного вида контактно-аккумуляторного электровоза.

Материалы исследования. Выбор типа, вида и параметров ТАБ определяется динамическими характеристиками электровозного состава и эффективностью тяговой системы в целом. Приведем пример расчета ТАБ для случая работы под пунктами погрузки. По технологии процесса погрузки руды в состав, перемещение вагонеток под пунктами погрузки (люками) производится электровозом. Для полного заполнения вагонеток рудой их перестановка под люком осуществляется дважды – по каждой заполняемой половине содержимого кузова.

Как показали замеры в шахтах, длительность перестановки вагонетки под люком составляет в среднем около 10 с, и суммарное время перестановки всех вагонеток в составе составит 250 с. Выбор параметров ТАБ осуществляется исходя из требований по выполнению технологических операций электровозной откатки. Общественная необходимая величина емкости ТАБ за период погрузки составит:

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

где Q_1 – расход емкости ТАБ на выполнение перестановок вагонеток под люками; Q_2 – расход емкости ТАБ на проезд подвижного состава по погрузочной выработке; Q_3 – расход емкости батареи при работе двигателя компрессора электровоза; Q_4 – расход емкости батареи на работу осветительных приборов электровоза. С учетом КПД и дополнительных затрат емкости ТАБ на протяжении рейса электровоза будет необходима общая емкость батареи около 70 А·ч. Этот расход емкости будет восполняться после подключения батареи к контактной сети на магистральных выработках.

На рынке аккумуляторных батарей в качестве химического источника тока для электротранспорта предлагается несколько видов аккумуляторов: свинцово-кислотные, литий-ионные, натрий-никель-хлоридные и никель-кадмиевые. По вопросу эксплуатационных характеристик известной линейки типов аккумуляторных батарей можно отметить следующее:

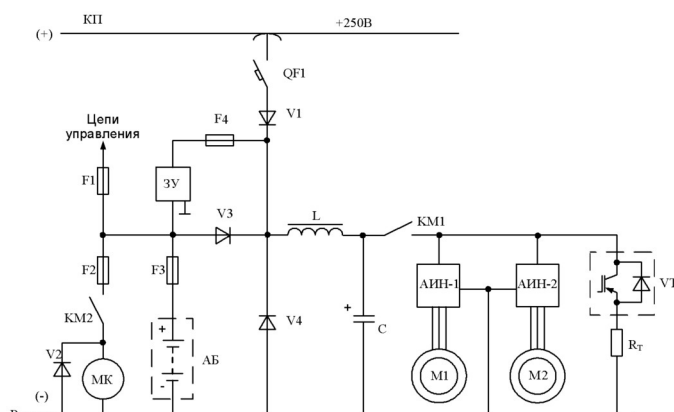


Рис. 1 Структура тягового электрохимического комплекса контактно-аккумуляторного электровоза

1. Свинцово-кислотный аккумулятор: КПД – $80 \div 90\%$, рабочая температура может колебаться в пределах от -40 до $+40$ градусов Цельсия, напряжение разряженного аккумулятора – 1,8 Вольт, ЭДС заряженного аккумулятора – 2,18 Вольт, напряжение – 2 Вольт, энергоёмкость – 30-60 Вт·ч/кг. Цикл жизни составляет 1000-1500 разряд/заряд батарей.

2. Литий-ионный аккумулятор: напряжение заряженного элемента – 4,2 Вольт, напряжение разряженного – 2,75 Вольт, температурный режим – -20 до $+60$ градусов Цельсия, время заряда – 2-4 часа. Цикл жизни – свыше 1000 разряд/заряд аккумулятора.

3. Натрий-никель-хлоридный аккумулятор: рабочая температура – $+300$ градусов Цельсия, энергоёмкость – 730 Вт·ч/кг, ЭДС – 2,6 Вольт. Цикл жизни – более 1000 разряд/заряд аккумулятора.

4. Никель-кадмиевый аккумулятор: рабочая температура от -50 до $+40$ градусов Цельсия, напряжение рабочее – 1,3 Вольт, ЭДС – 1,37 Вольт, мощность – 150-500 Вт/кг, энергоёмкость – 65 Вт·ч/кг. Цикл жизни – свыше 1000 разряд/заряд аккумулятора.

В настоящее время для шахтных электровозов используются никель-железные аккумуляторы (Ni-Fe) как более дешёвые за никель-кадмиевые аккумуляторы (Ni-Cd), не содержащие токсичный кадмий, имеющие оптимальный срок службы и высокую механическую прочность. Однако они характеризуются высоким саморазрядом и низкой отдачей по энергии.

Существуют также три основных вида никель-кадмиевых аккумуляторов: негерметичные с ламельными (ламельные аккумуляторы) и спечёнными электродами (безламельные аккумуляторы) и герметичные. Наиболее дешёвые ламельные никель-кадмиевые аккумуляторы характеризуются плоской разрядной кривой, высокими ресурсом и прочностью, но повышенной удельной энергией. Удельная энергия, скорость разряда Ni-Cd аккумуляторов со спечёнными электродами выше, они работоспособны при низких температурах, но более дорогие, характеризуются эффектом памяти и способностью к тепловому разгону. Герметичные Ni-Cd аккумуляторы характеризуются горизонтальной разрядной кривой, высокими скоростями разряда и способностью действовать при низких температурах, но они дороже герметизованных свинцовых аккумуляторов и характеризуются эффектом памяти. Недостатком никель-кадмиевых аккумуляторов является применение токсичного кадмия.

Свинцово-кислотные аккумуляторы имеют неплохие характеристики, а разработка их герметизированных конструкций ставит вопрос об их использовании в рудничных электровозах. Удельные весовые и объёмные характеристики свинцово-кислотных аккумуляторов достигнуты на уровне 20 – 50 Вт·ч/кг и 50 - 100 Вт·ч/л. К сожалению, коэффициент использования активных масс у свинцово-кислотных аккумуляторов достаточно низок, что обусловлено неравномерностью распределения процесса по толщине электродов и затруднением доставки серной кислоты к зоне реакции. Поэтому процесс протекает в основном на поверхности пластин. При малых и средних токах разряда электрод разряжается более равномерно, и коэффициент использования активных масс повышается, но не более чем до 65 – 80 %. По мере разряда, внутреннее сопротивление свинцово-кислотного аккумулятора увеличивается из-за роста сопротивления активных масс и электролита. При температуре ниже 0°C внутреннее сопротивление аккумуляторов значительно возрастает из-за охлаждения электролита.

Обобщая анализ характеристик свинцово-кислотных аккумуляторов, можно отметить, что использование свинцово-кислотных аккумуляторов для контактно-аккумуляторных электровозов имеет свои преимущества и недостатки. Так среднее разрядное напряжение у свинцово-кислотных аккумуляторов составляет – 2,1 В на один элемент, тогда как в щелочных – 1,1 В. Энергия разряда кислотных аккумуляторов по некоторым оценкам может в $1,4 \div 2,1$ раза превышать энергию щелочных аккумуляторов. Но следует указать, что во время зарядки свинцово-аккумуляторных батарей в контактно-аккумуляторных электровозах (торможение с электрической рекуперацией энергии, подзаряд батарей во время движения электровоза) химические реакции, которые протекают, могут быть опасными, особенно в случае высокой интенсивности зарядки. В свинцово-кислотных батареях может происходить выделение водорода и кислорода в результате гидролиза воды, которые повышают риск возникновения взрыва в горных выработках. Для этого случая система подзаряда должна эффективно контролировать процесс заряда батарей и не допускать выделения водорода и кислорода.

В литий-ионных аккумуляторах для отрицательного электрода применяют углеродный материал, в котором активным материалом положительного электрода служит оксид кобальта, в который также вмонтированы ионы лития. Электролитом является раствор соли лития в неводном растворителе. Удельные весовые и объёмные характеристики современных литий-ионных аккумуляторов достигнуты на уровне 100 – 260 Вт·ч/кг и 250 – 800 Вт·ч/л. Рабочее напряжение аккумуляторов составляет 3,5 – 3,7 В, а работоспособность сохраняется при снижении ёмкости до уровня 20 % С.

Литий-ионные аккумуляторы имеют высокую удельную энергию, высокий ресурс и способны работать при низких температурах. Благодаря высокой удельной энергии их производство в последние годы резко увеличилось. У литиевых аккумуляторов есть только два важных недостатка – высокая цена, и необходимость иметь специальную (обычно – встроенную) систему контроля заряда/разряда, которая предотвращает склонность литиевых аккумуляторов к самовозгоранию и, даже, взрыва при нарушении условий эксплуатации.

По удельной энергии после литий-ионных аккумуляторов на второе место выходят натрий-никель-хлоридные аккумуляторы, которые больше приспособлены к работе в тяжёлых условиях эксплуатации. Также у этого вида аккумуляторных батарей есть свои преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести: высокую удельную ёмкость, сопоставимую с литий-ионными аккумуляторами, низкую стоимость и широкую доступность основных материалов аккумулятора, большое время жизни аккумулятора – свыше 1000 полных цик-

лов заряда/разряда и свыше 7 лет активной эксплуатации, стойкость к выходу из строя отдельных аккумуляторных элементов в батарее через очень низкое сопротивление элементов, которые вышли из строя (до 5% от общего количества), высокую экологическую безопасность (основные компоненты натрий никель-хлоридных аккумуляторов экологически опасны).

Внешне элемент никель-хлоридных аккумуляторов представляет собой стальной прямоугольный параллелепипед, в который засыпается металлический натрий (материал отрицательного электрода), вставляется керамическая трубка из бета-глинозема, являющаяся одновременно и изолятором между положительным и отрицательным электродами, и твердым электролитом, проницаемым для ионов натрия. В керамический сепаратор засыпается материал положительного электрода: хлорид никеля и хлорид железа, порошок алюмохлорида натрия и вставляется контактная пластина, вывод которой располагается на торце аккумуляторного элемента. Поскольку все материалы электродов являются твердыми веществами при нормальных условиях, то для работы аккумулятора следует держать в разогретом до 300 °C состоянии.

Современные аккумуляторы являются не чисто натрий никель-хлоридными, а натрий никель-железо-хлоридными. Введение хлорида железа в состав положительного электрода способствует более низкому внутреннему сопротивлению аккумулятора. Также при разряде чисто натрий никель-хлоридной системы в конце разряда резко падает выходная мощность (почти в 2 раза), а при добавлении хлорида железа удается избежать данного эффекта.

Утилизация аккумуляторов очень проста – их можно отправлять на переплавку без какой-либо разборки аккумулятора. В результате переплавки образуется железо-никелевый сплав, который может использовать сталелитейная промышленность. Даже при простом выбрасывании батарея мало опасна для окружающей среды (основные компоненты и стальной корпус для окружающей среды либо малотоксичны либо вообще нетоксичны).

Внешний корпус батареи представляет собой стальной двустенный корпус, между стенками которого создан вакуум. Такой термос позволяет избежать большого рассеяния тепла батареями (в нормальных условиях рассеивается около 100Вт тепла), что важно не только для функционирования аккумуляторов, но и для обеспечения безопасности использования.

Для поддержания постоянства внутренней температуры внутри корпуса батареи имеется нагреватель и система воздушного охлаждения. Для разогрева аккумуляторов до рабочей температуры нагревателю требуется около суток. Потом нагреватель поддерживает температуру на рабочем уровне (выше 270 °C) за счет энергии батареи. При разряде выделяется около 10% от выданной энергии, что требует охлаждения аккумуляторов до температуры ниже максимальной рабочей (350 °C).

Для поддержки правильной работы аккумуляторной батареи должна быть встроена специальная система управления режимами работы. Система поддерживает внутреннее состояние батареи на оптимальном уровне, автоматически отключает питание при отсутствии нагрузки и в критических ситуациях (имеется встроенный датчик крушения). Вся система может управляться через последовательный порт компьютера с Windows. Доступна не только функция мониторинга состояния батареи в реальном времени, но и возможность тюнинга параметров аккумуляторной батареи под конкретную область применения.

К недостаткам натрий никель-хлоридных аккумуляторов можно отнести - необходимость наличия интеллектуальной системы управления батареями, необходимость поддержки высокой рабочей температуры внутри батареи (на уровне 300 °C и около 100 Вт мощности для поддержки этой температуры), для разогрева холодной батареи и приведение ее в рабочее состояние необходимо не менее суток.

Продолжительный срок эксплуатации и высокие показатели циклования ставят натрий никель-хлоридные аккумуляторы на одно из первых мест среди существующих аккумуляторов. На данный момент единственным препятствием является завышенная стоимость данного типа батарей. Как только состоится снижение цены одного киловатт-часа емкости батареи к уровню 300USD, что реально может быть достигнуто (себестоимость производства составляет меньше 150USD за 1 кВт·ч), то использование их в электротранспорте, в том числе и в электровозах, станет реальностью. Основные технические и экономические показатели аккумуляторов различных электрохимических систем приведены в таблице 1.

Таблица 1 Параметры аккумуляторов различных электрохимических систем.

Электрохимическая система аккумулятора	Диапазон рабочих температур аккумуляторов, °C	Удельная энергия аккумулятора, Вт·ч/кг	Относительная стоимость единицы энергии, грн/Вт·ч	Потеря емкости при хранении в заряженном состоянии, %/месяц	Срок службы в режиме постоянного подзаряда, год
Свинцово-кислотная, герметичная	-20 +40	20-50	0,8-1,8	10-15	3-10
Никель-кадмиевая, герметичная	-40 + +45	20-55	1,5-2	до 10	до 20
Литий-ионная	-10-+50	100-260	2.5-4	5-25	до 5
Никель-хлоридная	-20 - +40	40-100	1.6-2,4	15-25	до 5

Между тем, при проектировании контактно-аккумуляторных электровозов приходится решать вопрос выбора типа аккумулятора с учетом весо-габаритных показателей и энергоресурса. Проведенный анализ в этом

направлении показал, что в ближайшей перспективе наиболее целесообразным будет применение литий-ионных и натрий-никель-хлоридных видов аккумуляторов, в которых удельная весовая энергия будет составлять больше 200 Вт·ч/кг при ресурсе 3000 циклов (против 1000 циклов на сегодняшний день) и стоимости 0,12 \$/Вт·ч.

В 1996 году были изобретены литий-железо-фосфатные аккумуляторы, а массовое производство таких аккумуляторов было развернуто в 2008 г. Литий-железо-фосфатный аккумулятор является, на самом деле, разновидностью литий-ионного, в котором в катоде вместо кобальтата лития использован материал из LiFePO_4 . Такая замена материала катода привела к настолько существенному изменению параметров, что литий-железо-фосфатные аккумуляторы часто рассматривают как отдельную категорию источников питания. По сравнению с литий-ионными, да и другими аккумуляторами, литий-железо-фосфатные обладают практически рекордной долговечностью. Известны аккумуляторы этой системы, допускающие 7000 циклов заряда-разряда при снижении емкости до 80% от первоначального значения. Также, в отличие от обычных литий-ионных, данные аккумуляторы очень медленно деградируют при хранении, что позволяет хранить их до 15 лет. Литий-железо-фосфатные аккумуляторы можно зарядить примерно за 15 минут. Интересной особенностью является то обстоятельство, что большую часть времени работы аккумулятор поддерживает на выводах стабильное напряжение 3,2 В. В ряде случаев это позволяет обойтись без дополнительных стабилизаторов напряжения, усложняющих конструкцию и снижающих КПД устройства.

Перспективный литий-серный тип аккумуляторов, создан в 2004 году за счет применения другой конструкции катода. В литий-серных аккумуляторах он представляет собой жидкость, содержащую серу, что позволило увеличить максимальную плотность тока. При зарядке сера и литий превращаются в сульфид лития, при разрядке происходит обратный процесс разложения сульфата на серу и литий. Литий-серные аккумуляторы дают напряжение около 2,1 В, такое же, как у свинцово-кислотных аккумуляторов. Существующие образцы литий-серных аккумуляторов имеют удельную емкость до 400 Вт·ч/кг, теоретически же удельная емкость таких аккумуляторов может достигать 2600 Вт·ч/кг. Аккумулятор полностью безопасен, вероятность взрыва или возгорания при эксплуатации практически отсутствует. Благодаря этому аккумулятор можно сделать очень простым и легким по конструкции благодаря отсутствию систем защиты.

В 2013 году был создан экспериментальный прототип литий-серного аккумулятора с катодом из композитного материала, включающего в себя графен и серу. Благодаря этому удалось увеличить количество циклов заряд-разряд до 1500, но пока технология их недостаточно проработана для серийного производства.

Поиски и разработки, направленные на снижение стоимости относительно дорогих групп ТАБ, безусловно, будут длиться в дальнейшем. Снижение уровня цен на литий-ионные, натрий-никель-хлоридные аккумуляторы в соединении с решениями, которые разрешают предложить безопасные и большие емкости ТАБ на основе аккумуляторов этих электрохимических систем, создадут еще более привлекательные условия для расширения областей их применения как аккумуляторных батарей промышленного назначения.

Между тем, при этом не следует отвергать разработки в направлении создания автономных источников питания для тяговых электрохимических комплексов на базе, например, суперконденсаторов и других видов элементов накопления электрической энергии.

Выводы. 1. Контактно-аккумуляторные виды шахтных электровозов с синергетической системой тягового электротехнического комплекса позволяют решить проблемы электробезопасности и эффективного функционирования шахтного электровозного транспорта в подземных горных выработках.

2. Анализ параметров и характеристик различных видов аккумуляторов для формирования тяговых аккумуляторных батарей, которые в перспективе могут использоваться для контактно-аккумуляторных электровозов железорудных шахт, позволяет в настоящее время остановиться на применении литий-ионных и натрий-никель-хлоридных аккумуляторов. Внедрение рассмотренных видов аккумуляторов требует дополнительных исследований и разработок систем контроля и управление процессами заряда/разряда батарей.

Список литературы: 1. О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование. –Кривой Рог-Донецк: ЧП Щербатых А.В., 2015. – 428 с. 2. Синчук О.Н., Шокарев Д.А., Скапа Е.И., Гузов Э.С., Караманиц Ф.И. Синергетический тяговый асинхронный электротехнический привод для контактно-аккумуляторного двухосного электровоза//Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2011. –Вып. 4(16). С.65-68. 3. Синчук О.Н., Синчук И.О., Юрченко Н.Н., Чернышов А.А., Удовенко О.А., Пасько О.В., Гузов Э.С. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов. –К., ИЭД НАН Украины, 2006. – 252 с. 4. В.И.Емельянов. Перспективы совершенствования промышленных аккумуляторных батарей. Режим доступа: <http://market.elec.ru/nomer/32/perspektivy-sovershenstvovaniya-promyshlennyh-akku>.

Bibliography (transliterated): 1. Sinchuk O.N., Guзов E.S. et al. Shahtnyiy elektrovoznyiy transport. Teoriya, konstruktzii, elektrooborudovanie. - Krivoy Rog-Donetsk: ChP Scherbatyih A.V.: 2015. Print. 2. Sinchuk O.N., Shokarev D.A. et al. "Sinergeticheskiy tyagovyyiy asinhronnyiy elektrotehnicheskiiy privod dlya kontaktno-akkumulyatornogo dvuhosnogo elektrovosa." *Elektromehanichni ta energozberigayuchi sistemi* Vol. 4(2011): 65-68. Print. 3. Sinchuk O.N., Sinchuk I.O. et al. Kombinatorika preobrazovateley napryazheniya sovremennyih tyagovyih elektropriwodov rudnichnyih elektrovosov. Kiev: IED NAN Ukrainyi, 2006. Print. 4. Emelyanov V.I. Prospects for improving industrial batteries. Available at: <http://market.elec.ru/nomer/32/perspektivy-sovershenstvovaniya-promyshlennyh-akku>

Поступила 05.04.2017